

ОБ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2020 г. А. А. Спивак^{1, *}, С. Л. Шалимов^{2, **}, С. А. Рябова^{1, 2}, В. А. Харламов¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН (ИДГ РАН), г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

*E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru

**E-mail: pmsk7@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2019 г.

После доработки 20.02.2020 г.

Принята к публикации 28.02.2020 г.

На основе анализа данных геофизической обсерватории “Михнево” и Центра Геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН рассмотрен отклик приземного слоя атмосферы на сильные землетрясения магнитудой ≥ 7 . Показано, что с землетрясением Тохоку (11.03.2011 г., Япония) можно связать возникшие после него вариации атмосферного давления с периодами в диапазоне 8–11 ч, а ряду рассмотренных в работе сильных землетрясений сопутствуют вариации атмосферного давления с периодами, близкими к синглетам основного собственного колебания Земли ${}_0S_2$. В качестве другого эффекта после землетрясений установлено присутствие в атмосфере акустико-гравитационных волн с периодом, близким к периоду Брента–Вайсаля на значительных расстояниях от эпицентра.

Ключевые слова: землетрясение, атмосфера, атмосферное давление, вариации, акустические колебания.

DOI: 10.31857/S0002333720040080

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение эффектов, сопровождающих землетрясения, представляется важным как с точки зрения совершенствования и разработки новых моделей указанных событий, так и понимания общей картины их развития. При этом другой важной задачей является определение отклика геофизической среды и геофизических полей на сильные возмущения литосферы, что с учетом постоянно происходящего взаимодействия между геосферами помогает устанавливать их динамические характеристики.

Землетрясения, особенно сильные, проявляются не только в виде сейсмических волн, резких изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и, как результат, их физико-механических свойств, но также возмущениями верхних геосфер — атмосферы и ионосферы [Перевалова и др., 2016; Шалимов и др., 2017]. Особый интерес представляет рассмотрение процесса передачи энергии от литосферы атмосфере при движении земной поверхности в результате землетрясения [Гармаш и др., 1989; Швед и др., 2018]. Вызванные землетрясением вертикальные движения земной коры и сейсмические волны порождают вариации давления в приземной области атмосферы [Голицын, Кляцкин, 1967; Шалимов и др., 2019; Jones et al., 2017;

Mutschlecner, Whitaker, 2005]. При этом представляется важным, что возбуждаемые землетрясениями (и другими мощными источниками в литосфере и на земной поверхности) акустико-гравитационные волны являются одним из основных факторов, определяющих перенос энергии на ионосферные высоты.

В настоящей работе представлены результаты инструментальных наблюдений за некоторыми атмосферными эффектами, сопровождающими сильные землетрясения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории “Михнево” (МНВ) ИДГ РАН (координаты: 54.94° N; 37.73° E) и Центре геофизического мониторинга (ЦГМ) г. Москвы (координаты: 55.71° N; 37.57° E) [Адушкин и др., 2016; Спивак и др., 2016]. Для анализа использовались ряды цифровых записей атмосферного давления P и микробарических вариаций, полученных на земной поверхности в периоды сильных землетрясений. Регистрация атмосферного давления и других метеопараметров, характеризующих состояние атмосферы, выполнялась с помощью автоматизированной цифровой метеостанции Davis Vantage Pro 2. Микробарические



Рис. 1. Внешний вид акустической станции в МНУ.

вариации регистрировались с помощью микробарометра МБ-03, входящего в состав акустической станции МНУ и обеспечивающего устойчивую регистрацию акустических сигналов амплитудой от 0.01 до 200 Па в диапазоне частот 0.0003–10 Гц (с целью снижения влияния температуры окружающего воздуха микробарометр помещен в скважину на глубину 2.5 м). Для выделения полезного сигнала на фоне ветровой турбулентности в приземном слое атмосферы на входе микробарометра установлен шумоподавляющий фильтр в виде шестилучевой звезды (рис. 1), обеспечивающий подавление помехи с коэффициентом ~ 1.5 (по амплитуде) в полосе частот 0.1–10 Гц. Для анализа формировались цифровые ряды записей с дискретностью 0.05 с.

Результаты регистрации выложены на сайте ИДГ РАН в графическом и цифровом виде¹. Оценка спектров вариаций P выполнялась на основе метода параметрической авторегрессии [Канасевич, 1985; Марпл, 1990]. При выделении синглетов собственного колебания Земли ${}_0S_2$ и акустико-гравитационных волн использовался метод выделения квазигармонических составляющих на основе адаптивной режекторной фильтрации [Уидроу, Стирнз, 1989].

¹ www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/

3. ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ТОХОКУ

С целью демонстрации наличия длиннопериодных вариаций атмосферного давления с периодом вблизи 10 ч, вызванных сильными землетрясениями, в настоящей работе в качестве примера рассмотрено катастрофическое событие Тохоку – одно из наиболее сильных землетрясений Японии, произошедшее 11.03.2011 г. [Тихонов, Ломтев, 2011]. По имеющимся данным событие с магнитудой ~ 9 (по поверхностным волнам $M_S = 8.8$) произошло в 5:46 УТ. Координаты основного толчка: 38.29° N; 142.69° E (расстояние от МНУ до очага рассматриваемого землетрясения составляет ~ 7450 км). Последствия землетрясения характеризовались, помимо сейсмического, также и геофизическими эффектами (вариации магнитного поля и т.д.), значительными смещениями земной поверхности, а также возникновением цунами [Shevchenko et al., 2014].

Известно, что в результате сильных землетрясений возникают длиннопериодные колебания Земли как совпадающие с периодами ее собственных колебаний, так и с заметно большими периодами, например ~ 120 мин и ~ 11 ч [Соболев, 2013; 2018]. Можно полагать, что квазигармонические движения земной поверхности с перио-

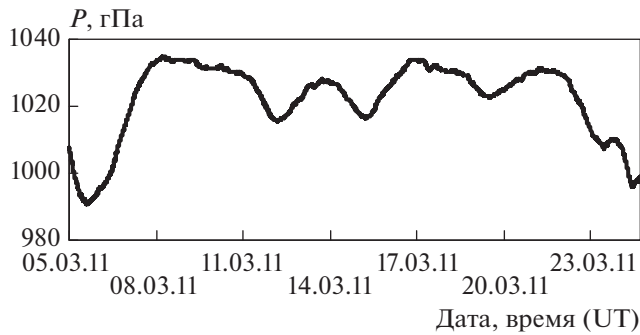


Рис. 2. Изменение атмосферного давления в МНВ в период землетрясения Тохоку.

дом, например, вблизи 11 ч могут быть обусловлены барическими возмущениями в атмосфере с близкими периодами.

На рис. 2 приведен график изменения атмосферного давления P со временем t за период с 5 по 25 марта 2011 г. по данным МНВ. Из данных рис. 2 следует, что землетрясение произошло в период относительной стабильности атмосферного давления в МНВ (амплитуда вариаций не превышает 15 гПа). Как это следует из рис. 2, основные вариации атмосферного давления в это время характеризуются периодом ~ 70 ч. Это позволяет анализировать периодичности вариаций P с периодами вблизи 10 ч, которые, во-первых, не совпадают с характерными для рассматриваемого периода времени вариациями атмосферного давления и, во-вторых, они заметно меньше 70 ч.

На рис. 3 приведена СВАН диаграмма вариаций атмосферного давления, полученная в результате обработки данных МНВ за период с 11 по 16 марта 2011 г. Из рис. 3 следует, что приблизительно через 7–8 ч после землетрясения в МНВ было зарегистрировано повышение вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов 6–11 ч, которые наблюдались более трех суток. Оценки времени распространения сигнала от очага землетрясения до МНВ t_0 , выполненные с учетом расстояния до очага и предполагаемой скорости распространения длиннопериодных возмущений в атмосфере ($\sim 280\text{--}300$ м/с [12]) дают величину $t_0 = 6.9\text{--}7.4$ ч., что свидетельствует о том, что наблюдаемые в МНВ вариации P с большой вероятностью связаны с возмущениями, вызванными в атмосфере очагом землетрясения Тохоку.

Авторегрессионный спектр $P(t)$, вычисленный за период с 11 по 21 марта 2011 г., приведен на рис. 4 в сравнении со спектром, вычисленным за шестидневный период, непосредственно предшествующий землетрясению. Из рис. 4 видно, что наряду с максимумом вблизи периода ~ 12 ч, связанным с группой близких по периодам полусуточных волн лунно-солнечного прилива, после землетрясения на спектре вариаций P отчетливо выделяются пики 1–5 с периодами соответственно 8.5; 9.4; 10; 10.4 и 11 ч. Это подтверждает, в частности, наше предположение о том, что обнаруженные ранее колебания Земли с периодом ~ 11 ч после рассматриваемого события [Соболев, 2018] проявляются также и в атмосферных процессах.

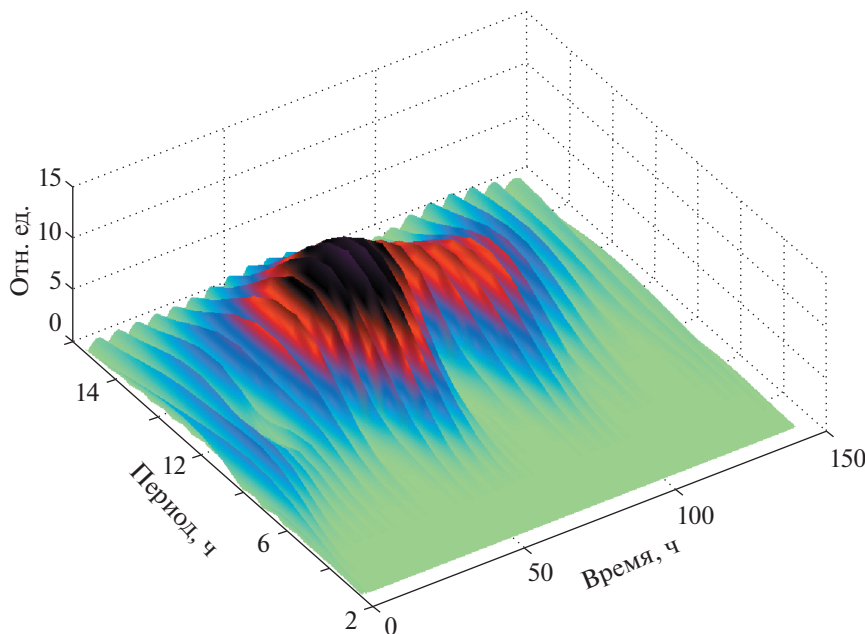


Рис. 3. Спектрально-временная диаграмма вариаций атмосферного давления в период землетрясения Тохоку (данные МНВ).

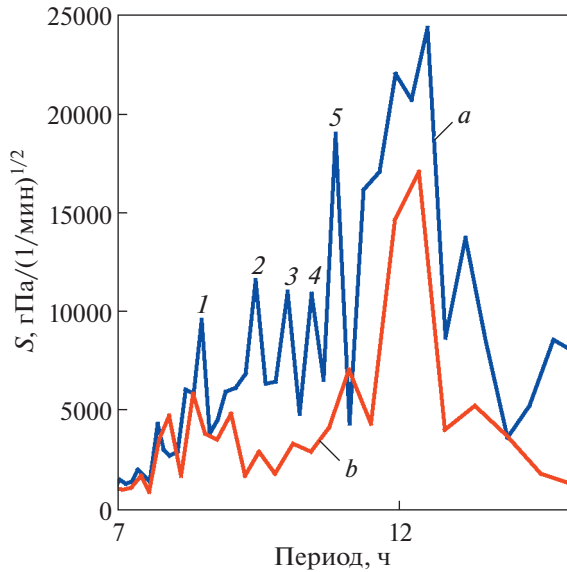


Рис. 4. Спектральная плотность вариаций атмосферного давления в период предшествующий (b) и после (a) землетрясения Тохоку по данным МНВ; 1–5 – квазигармонические составляющие колебаний, возникшие в результате сейсмического события.

Но при этом картина атмосферных возмущений, вызванных землетрясением в рассматриваемом диапазоне периодов, представляется гораздо более сложной по сравнению с твердой землей: возбуждаются колебания не одного 11-часового, а нескольких близких периодов в интервале 8–11 ч.

4. МИКРОБАРИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ С ПЕРИОДАМИ, БЛИЗКИМИ К ПЕРИОДУ ОСНОВНОЙ МОДЫ ${}_0S_2$ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМЛИ

Собственные колебания Земли проявляются повсеместно в сейсмически спокойные периоды [Линьков и др., 1989; Nava et al., 1998; Tanimoto et al., 1998], но наиболее ярко проявляются при сильных землетрясениях [Милоков и др., 2015; Соболев, 2015; Deen et al., 2017; Wan Yong-ge et al., 2007]. Представляется естественным, что вызванные при этом вертикальные движения земной коры и распространяющиеся сейсмические поверхностные волны порождают возмущения в приземном слое атмосферы, причем с периодами собственных колебаний Земли². Выполненный в настоящей работе анализ барических вариаций свидетельствует о том, что сильным землетрясениям сопутствуют колебания в атмосфере с периодами, близкими к периоду основной сфероидаль-

ной 54-минутной моды ${}_0S_2$ (частота ~ 0.309 мГц). На рис. 5 приведена СВАН-диаграмма микробарических вариаций, полученная в результате режекторной фильтрации [Уидроу, Стирнз, 1989] на частотах синглетов основной сфероидальной 54-минутной моды ${}_0S_2$ 0.29–0.32 мГц результатов регистрации в МНВ в период после землетрясения магнитудой 7.8 (Непал, 25.04.2015 г.).

Из рис. 5 следует, что на вторые сутки после данного события в МНВ в атмосфере зафиксированы повышенные микробарические вариации с периодами в интервале 0.29–0.32 мГц, продолжавшиеся около 2-х сут. Аналогичный результат демонстрирует рис. 6, на котором приведена СВАН-диаграмма микробарических вариаций, полученная в период землетрясения 30.05.2015 г. в Японии магнитудой 7.8.

Из рис. 5 и рис. 6 видно, что микробарические вариации характеризуются не одной, а несколькими близкими частотами. Такая картина характерна для всех рассмотренных событий. В качестве примера на рис. 7 приведена спектральная плотность микробарических вариаций, зарегистрированных при землетрясении в Японии (21.11.2016 г., магнитуда 6.4).

Наличие близких частот в микробарических вариациях объясняется расщеплением мультиплета ${}_0S_2$ (вырожденное значение собственной частоты рассматриваемой моды ${}_0f_2^0 = 0.3096$ мГц) на пять синглетов с частотами ${}_0f_2^m$ ($m = -2; -1; 0; 1; 2$), значение которых для вращающейся эллиптической модели Земли определяются соотношением [Жарков, 2012; Милоков, 2005]:

$$\frac{{}_0f_2^m}{{}_0f_2} = 1 + {}_0\alpha_2 + m{}_0\beta_2 + m{}_0\gamma_2, \quad (1)$$

где ${}_0\alpha_2$, ${}_0\beta_2$ и ${}_0\gamma_2$ – параметры расщепления, значение одного из которых (параметр ${}_0\beta_2$) определяется эффектом вращения Земли, двух других – ${}_0\beta_2$ и ${}_0\gamma_2$ отличием ее формы от сферически симметричной.

Частоты синглетов, полученные по результатам анализа спектров, приведены в табл. 1, что позволяет оценить значения параметров ${}_0\beta_2$ и ${}_0\gamma_2$ из соотношений:

$${}_0\beta_2 = \frac{{}_0f_2^1 - {}_0f_2^{-1}}{2{}_0f_2}, \quad {}_0\gamma_2 = \frac{{}_0f_2^0 - {}_0f_2^{-1}}{{}_0f_2} - {}_0\beta_2.$$

Конкретные значения параметров ${}_0\beta_2$ и ${}_0\gamma_2$, полученные в настоящей работе с использованием данных табл. 1, составляют:

$${}_0\beta_2 \approx 1.475 \times 10^{-2}, \quad {}_0\gamma_2 \approx -1.27 \times 10^{-3}.$$

Следует отметить, что, если полученное значение параметра ${}_0\beta_2$ близко по величине к значению

² Нельзя не указать на наличие другой точки зрения: собственные колебания Земли проявляются в результате вариаций атмосферного давления [Швед и др., 2018; Tanimoto, Um, 1999].

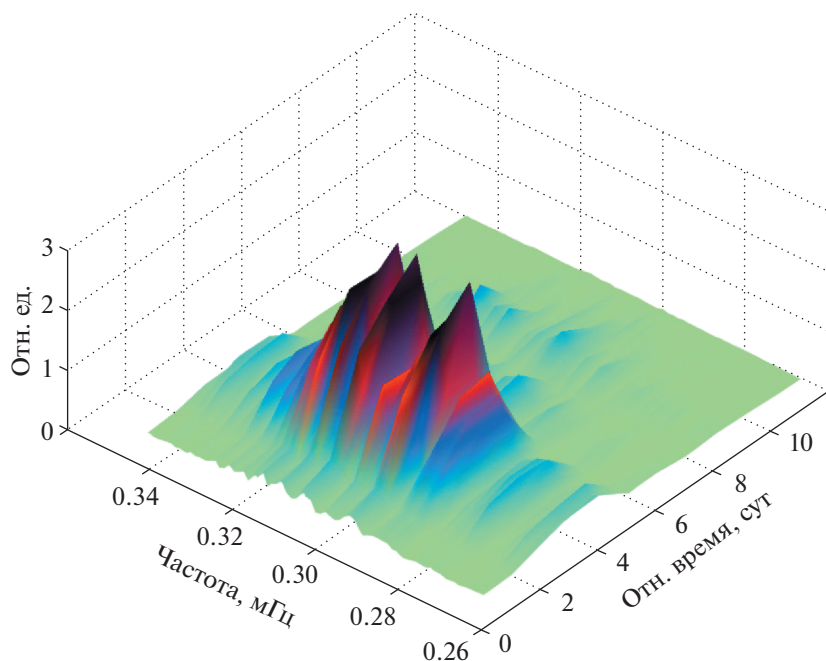


Рис. 5. СВАН-диаграмма барических вариаций в МНУ в период землетрясения в Непале 25.04.2015 г.

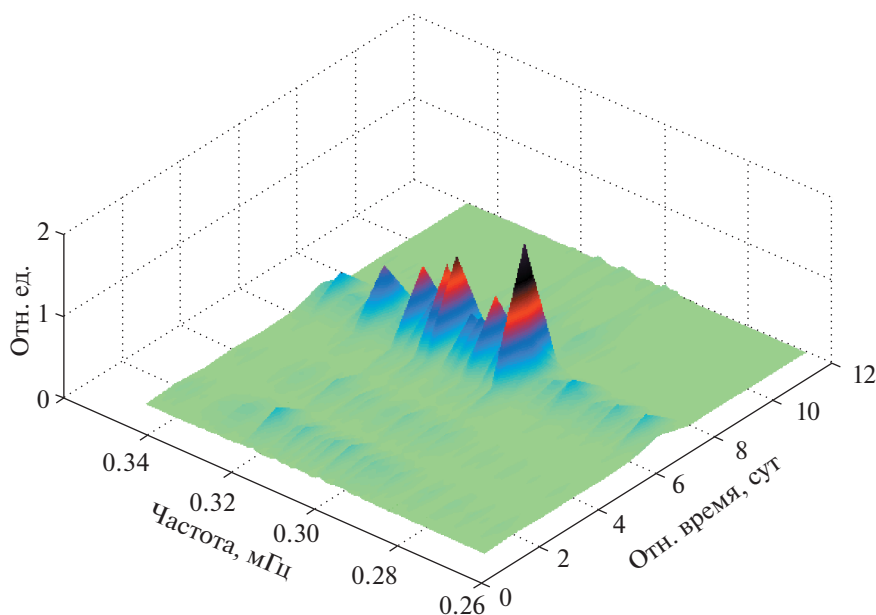


Рис. 6. СВАН-диаграмма барических вариаций в МНУ в период землетрясения в Японии 30.05.2015 г.

1.49×10^{-2} , рассчитанному теоретически по модели Q1 [Gilbert, Backus, 1968], то полученная величина параметра γ_2 существенно превышает его теоретическое значение -0.953×10^{-3} , что является предметом дальнейших исследований, связанных с установлением особенностей проявления собственных колебаний Земли в атмосфере.

5. ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Неоднократно отмечалось, что воздействие землетрясений на верхние геосферы, в частности, ионосферу осуществляется посредством акустико-гравитационных волн [Гармаш и др., 1989; Гохберг, Шалимов, 2008; Гохберг и др., 2014; Черногор, 2019; Astafyeva, Afraimovich, 2006; Jones et al.,

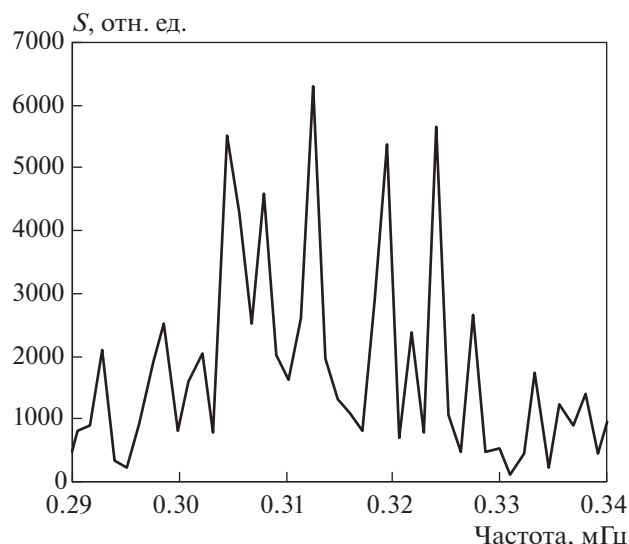


Рис. 7. Спектральная плотность барических вариаций, зарегистрированных в МНУ в период после землетрясения в Японии 21.11.2016 г.

2017; Liu, Klostermeyer, 1975; Sun et al., 2016]. В связи с этим представляет интерес рассмотрение возможного отклика атмосферы на землетрясения на частотах ниже частоты Брента–Вяйсаля [Госсард, Хук, 1975].

Выполненный в настоящей работе анализ спектральных характеристик атмосферных колебаний показывает, что с сильными землетрясениями ассоциируются колебания атмосферы с частотами в диапазоне 5–12 мин. В качестве примера на рис. 8 приведены скользящие спектры барических микропульсаций, зарегистрированных в МНУ и ЦГМ в период после землетрясения с магнитудой ~ 7 , произошедшего в Греции 24.05.2014 г. (время в очаге $\sim 09:25$ UT). Более детально спектральные вариации барических микропульсаций в период времени непосредственно после землетрясения демонстрирует рис. 9, на котором приведены результаты вейвлет-анализа результатов регистрации (при расчетах применялся вейвлет Морле). Анализ данных, приведенных на рис. 8, показывает, что через примерно 2 ч после землетрясения в МНУ и ЦГМ зарегистрированы повышенные спектры амплитудных вариаций ба-

рических микропульсаций с максимумом в районе периодов ~ 8 –10 мин, что может свидетельствовать о приходе акустико-гравитационной волны от эпицентра события. При этом разность времен вступлений в пункты МНУ и ЦГМ позволяет оценить пеленг на источник события. В данном случае вычисленный пеленг близок к направлению на эпицентр события. Длительность колебаний с этими периодами составляет для МНУ и для ЦГМ примерно 2 ч.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере отклика атмосферы на сильные землетрясения в виде барических колебаний в широком диапазоне частот.

Вариации атмосферного давления в диапазоне периодов 8–11 ч. Хотя исчерпывающая интерпретация зарегистрированного эффекта, связанного с наличием длиннопериодных вариаций атмосферного давления с набором периодов в окрестности 10 ч требует дальнейших исследований, можно высказать предположение о возможной причине возбуждения длиннопериодных атмосферных колебаний, основываясь на гипотезе Лэмба [Лэмб, 1947]. Эту гипотезу можно рассматривать как развитие принадлежащей Лапласу теории распространения волн в изотермической атмосфере. Лэмб предположил, что в атмосфере могут распространяться длинные плоские волны, аналогичные тем, что распространяются в океане определенной глубины. Дисперсионное уравнение для таких волн имеет вид $\omega = \sqrt{ghk}$, где: g – ускорение свободного падения; h – эквивалентная глубина равная $h = \gamma H$; γ – отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и объеме соответственно; H – характерная высота атмосферы; ω , k – частота и волновое число волны. Эти волны плоские или двумерные в том смысле, что вертикальная скорость у них отсутствует, и на всех высотах колебания находятся в одной фазе. В изотермической атмосфере $\gamma = 1$, так что при $H = 6.6$ км находим фазовую скорость волны равной 254 м/с. Если теперь принять для оценки найденную в работе [Соболев, 2018] приблизительную длину волны колебаний $\lambda \approx 8000$ км,

Таблица 1. Значения частот (мГц) компонент мультиплета ${}_0S_2$, полученных из анализа результатов инструментальных наблюдений в период землетрясений 2015 г.

Землетрясение	Магнитуда	$m = -2$	$m = -1$	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$
Непал (115 день)	7.9	0.2981	0.3041	0.3095	0.3148	0.3199
Чили (260 день)	8.4	0.3001	0.3048	0.3096	0.3149	0.3194
Индонезия (240 день)	7.0	0.2994	0.3047	0.3096	0.3140	0.3194
Япония (150 день)	8.5	0.2986	0.3040	0.3102	0.3148	0.3209

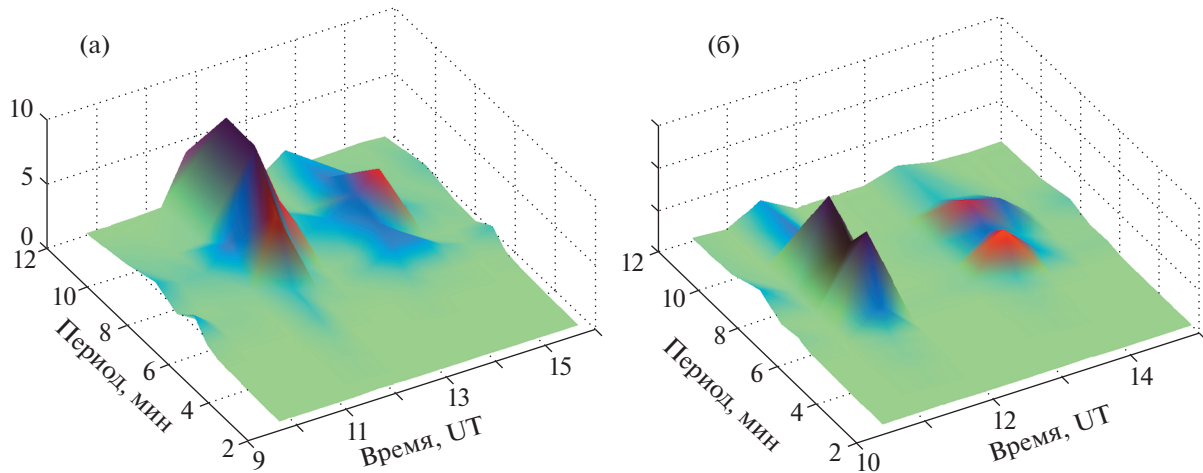


Рис. 8. Спектры барических вариаций после режекторной фильтрации в период землетрясения в Греции 24.05.2014 г. по данным МНВ (а) и ЦГМ (б).

то период колебаний будет составлять ~9 ч, что вполне соответствует измеренному в настоящей работе диапазону.

Оценим энергию этих волн после их генерации. Кинетическая энергия в столбе высотой 1 см от участка земной поверхности равна:

$$E_k = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2} \rho u^2 r dr =$$

$$= 2\pi c^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} \rho u^2 t dt = \frac{2\pi A^2}{\rho} \int_{t_1}^{t_2} \sin \omega t dt,$$

где: ρ – плотность воздуха; u – радиальная компонента скорости волны, распространяющейся со скоростью c и равная $p/c\rho$ [Ландау, Лифшиц, 1986]; A – амплитуда колебаний давления. Полагая $\rho = 10^{-3}$ г/см³, при длительности возмущения порядка 10 ч получим, что для амплитуды 1–10 Па кинетическая энергия возмущения на масштабе порядка эффективной высоты атмосферы будет 10^{20} – 10^{22} эрг, т.е. 0.01–1% энергии события.

Барические вариации с частотами собственных колебаний Земли. Поскольку собственные колебания Земли можно рассматривать как стоячие волны [Жарков, 1983], то для описания генерации колебаний приземного давления обычно рассматривают аналогию с “поршневым” воздействием колеблющейся поверхности Земли [Petrova et al., 1996]. Далее отметим, что сфероидальные колебания Земли являются связанными колебаниями упругого и гравитационного полей земных недр [Жарков, 1983], однако возмущения силы тяжести по сравнению с возмущением атмосферных параметров имеют порядок $H^2/R_E^2 \ll 1$ (где H – характерная высота однородной атмосферы; R_E – радиус Земли).

Синхронные измерения посредством микробарографов и сейсмографов [Petrova et al., 1996], позволяющие определить направление потока волновой энергии, указывают на сейсмические осцилляции как причину атмосферных колебаний. При этом метеорологические аномалии (например, циклоны) способны изменить направление потока волновой энергии.

Генерация акустико-гравитационных волн. Диапазон зарегистрированных в настоящей работе колебаний (5–12 мин) соответствует АГВ (ветка внутренних волн). Учитывая расстояние между местом события и пунктом регистрации колебаний, а также время, прошедшее между событием и регистрацией колебаний, можно получить, что скорость распространения возмущений приблизительно равна 250 м/с. Эта скорость также соответствует распространяющимся АГВ. Вместе с тем, диапазон зарегистрированных колебаний исключает прямое распространение возмущений давления из области предполагаемой генерации (эпицентр землетрясения). Возникающий при этом вопрос о механизме распространения таких колебаний в атмосфере вызывает особый интерес и требует проведения дополнительных исследований. Можно предполагать, что достигшие стратосферы и термосферы колебания над эпицентральной областью вызывают волновой процесс в соответствующих волноводах на этих высотах [Hetch et al., 2001] с последующим распространением волн до места регистрации. При этом, однако, остается нерешенным вопрос о перенаправлении части энергии АГВ в направлении к земной поверхности.

Следует отметить, что при наличии ветровой структуры при определенных условиях возможно отражение к земной поверхности распространяющейся в ионосферу внутренней волны [Ерохин

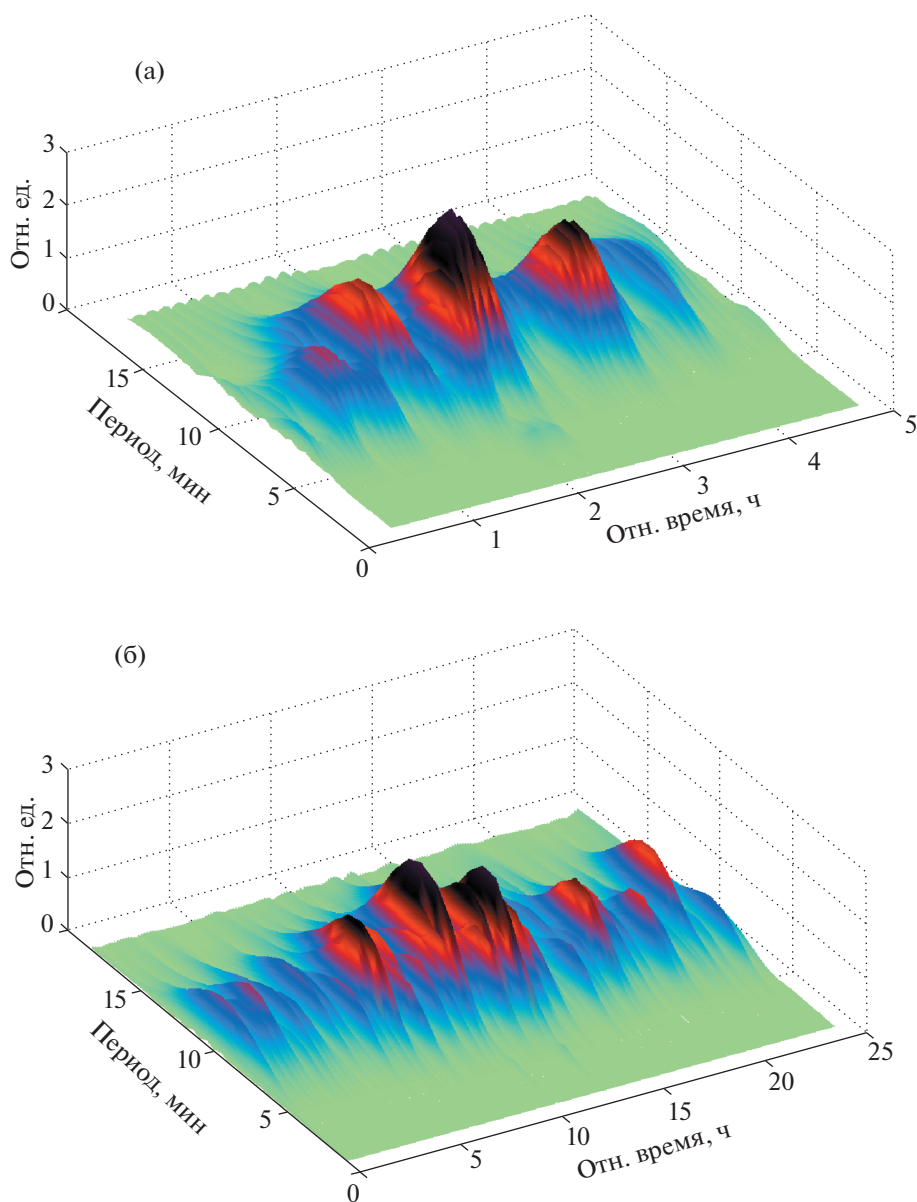


Рис. 9. Вейвлет-скалограммы барических вариаций в период землетрясения в Греции 24.05.2014 г. по данным MHV (а) и ЦГМ (б).

и др., 2007]. Нельзя исключить также генерацию АГВ движущимися атмосферными фронтами, грозами и термиками.

Обращаясь к рис. 9 следует особо отметить, что вызванные землетрясением АГВ характеризуются в первые часы после события нестабильной амплитудой: явно проявляется временная периодичность амплитудных вариаций, что представляет собой предмет более детальных исследований.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований дополняют имеющиеся представления о возмож-

ных возмущениях атмосферы в периоды сильных землетрясений. При этом получено, что наблюдается выраженная дискретность периодов вызванных барических пульсаций в диапазоне периодов 8–11 ч. Установлено также наличие барических пульсаций на частоте основной фундаментальной моды ${}_0S_2$ собственного колебания Земли. При этом при соответствующей обработке результатов регистрации барических вариаций удастся выделить 5 синглетов моды ${}_0S_2$.

Показано, что формирующиеся в эпицентре землетрясения внутренние гравитационные волны имеют способность к латеральному распространению (что позволяет регистрировать их на

значительных расстояниях), причем в достаточно узком спектральном диапазоне 5–12 мин.

Установление природы и возможных механизмов возбуждения вариаций атмосферного давления в периоды сильных сейсмических событий требует проведения дополнительных более детальных исследований. Тем не менее, авторы полагают, что полученные в настоящей работе данные могут расширить имеющиеся представления о воздействии землетрясений на атмосферу и окажутся полезными при разработке и верификации теоретических и расчетных моделей как самих землетрясений, так и сопровождающих их геофизических процессов.

Полученные данные свидетельствуют о сложности процессов, протекающих в атмосфере в периоды сильных землетрясений. Вопросы, поднятые в настоящей статье, требуют внимательного рассмотрения, для чего необходимо продолжить исследования, направленные на установление механизмов возмущения атмосферы сейсмическими событиями и роли разных факторов, влияющих на характер вызванных колебаний. Одновременно следует подчеркнуть, что, как это показано выше, отклик атмосферы на землетрясения может быть весьма полезным при рассмотрении глобальных процессов, характеризующих динамику Земли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН (Рег. № НИР АААА-А19-119021890067-0, шифр темы 0146-2019-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю.* “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // *Физика Земли*. 2016. № 1. С. 108–120.
- Гармаш С.В., Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Швед Г.М.* Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1989. № 12. С. 1290–1299.
- Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. “Мир”. 1975. 532 с.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 296 с.
- Гохберг М.Б., Ольшанская Е.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Ионосферный отклик на акустический сигнал от подводных землетрясений по данным GPS // *Физика Земли*. 2014. № 1. С. 3–10.
- Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Шалимов С.Л.* Прохождение крупномасштабных внутренних гравитационных волн через ветровые структуры в нижней и средней атмосфере на ионосферные высоты // *Геофизические исследования*. 2007. № 7. С. 53–64.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 1983.
- Жарков В.Н.* Физика земных недр. М.: Наука и образование. 2012. 384 с.
- Канасевич Э.Р.* Анализ временных последовательностей в геофизике. М.: Недра. 1985. 400 с.
- Кашкин В.Б.* Внутренние гравитационные волны в тропосфере // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.
- Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1984. 403 с.
- Куличков С.Н., Авиллов К.В., Буш Г.А., Попов О.Е., Распопов О.М., Барышников А.К., Ривелл Д.О., Уитекер Р.В.* Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. № 1. С. 3–12.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986.
- Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Зурошвили Д.Д.* // Сейсмогравитационные колебания Земли и связанные с ними возмущения атмосферы // *Докл. АН СССР*. 1989. Т. 306. № 2. С. 314–317.
- Лэмб Г.* Гидродинамика. М.–Л.: Гостехиздат. 1947. 928 с.
- Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. 1990. 584 с.
- Милоков В.К.* Наблюдения тонкой структуры основной сфероидальной моды Земли 0S2 // *Физика Земли*. 2005. № 4. С. 16–22.
- Милоков В.К., Виноградов М.П., Миронов А.П., Мясников А.В., Перельгин Н.А.* Собственные колебания Земли, возбужденные тремя крупнейшими землетрясениями последнего десятилетия, по деформационным наблюдениям // *Физика Земли*. 2015. № 2. С. 21–36.
- Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Воейков С.В., Быков В.Г., Герасименко М.Д., Парк Р.Н.* Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Тохоку, в дальней от очага зоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 1. С. 186–196.
- Соболев Г.А.* О некоторых свойствах возникновения и эволюции колебаний Земли после землетрясений // *Физика Земли*. 2013. № 5. С. 12–27.
- Соболев Г.А.* Вызванные землетрясениями когерентные колебания Земли // *Физика Земли*. 2015. № 1. С. 18–27.
- Соболев Г.А.* Возникновение колебаний 11-часового периода после землетрясения Тохоку // *Докл. РАН*. 2018. Т. 480. № 3. С. 348–352.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // *Сейсмические приборы*. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
- Тихонов И.Н., Ломтев В.Л.* Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г.: тектонические и сейсмологические аспекты // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т. 10. № 2. С. 49–66.
- Уидроу Б., Стирнз С.* Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь. 1989. 440 с.
- Черногор Л.Ф.* Геомагнитные возмущения, сопровождавшие великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59. № 1. С. 69–82.

- Шалимов С.Л., Нестеров И.А., Воронцов А.М.* О возмущениях ионосферы, регистрируемых посредством GPS после землетрясения и цунами в Тохоку 11.03.2011 // *Физика Земли*. 2017. № 2. С. 1–12.
- Швед Г.М., Голицын Г.С., Ермоленко С.И., Кукушкина А.Е.* Связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере // *Докл. РАН*. 2018. Т. 481. № 3. С. 315–319.
- Astafyeva E.I., Afraimovich E.L.* Long-distance traveling ionospheric disturbances caused by great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // *Earth, Planets Space*. 2006. V. 58. № 8. P. 1025–1031.
- Backus G.E., Gilbert J.F.* Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1967. V. 13. P. 247–276.
- Deen M., Wielandt E., Stutzmann E., Crawford W., Barruol G., Sigloch K.* First observation of the Earth's permanent free oscillations on ocean bottom seismometers // *Geophys. Res. Letters*. 2017. V. 44. №. 10. P. 10988–10996.
- Gilbert J.F., Backus G.E.* Approximate solutions to the inverse normal mode problem // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1968. V. 58. P. 103–131.
- Hecht J.H., Walterscheid R.L., Hickey M.P., Franke S.J.* Climatology and modelling of quasi-monochromatic atmospheric gravity waves observed over Urbana, Illinois // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106(D6). P. 5181–5195.
- Jones R.M., Ostrovsky L.A., Bedart A.J.* Ionospheric effects of magneto-acoustic-gravity waves: dispersion relation // *J. Atmosph. Solar. Terr. Phys.* 2017. V. 159. P. 7–22.
- Liu C.H., Klostermeyer J.* Excitation of acoustic-gravity waves in realistic thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1975. V. 37. № 8. P. 1099–1108.
- Muschlecner J.P., Whitaker R.W.* Infrasound from earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D01108.
- Nava K., Suda N., Fukao Y., Sato T., Aoyama Y., Shibuya K.* Reply // *Earth and Planets Space*. 1998. V. 50. P. 887–892.
- Petrova L.N., Osypov K.S., Savel'ev D.D., Shved G.M.,* Forcing atmospheric oscillations by long-period seismic oscillations: a case study // *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1996. V. 58. № 12. P. 1317–1322.
- Shevchenko G., Ivelskaya T., Loskutov A.* Characteristics of the 2011 Great Tohoku tsunami on the Russian Far East coast deep-water and coastal observations // *Pure and Applied geophysics*. 2014. V. 171. P. 3329–3350.
- Sun Y.-Y., Liu J.-Y., Lin C.-Y., Tsai H.-F., Chang L.C., Chen C.-Y., Chen C.-H.* Ionospheric F2 region perturbed by the 25 April 2015 Nepal earthquake // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2016. V. 121. № 6. P. 5778–5784.
- Tanimoto T., Um J., Nishida K., Kobayashi N.* Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days // *Gephys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1553–1556.
- Tanimoto T., Um J., Nishida K., Kobayashi N.* Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1553–1556.
- Wan Yong-Ge, Sheng Shu-Zhong, Zhou Gong-Wei, Guo Yan-Ping, Shang Dan.* Spheroidal oscillations of the Earth stimulated by the Sumatra-Andaman earthquake with CDSN data // *Acta Seismologica Sinica*. 2007. V. 20. № 4. P. 392–404.

Atmospheric Manifestations of the Strong Earthquakes

A. A. Spivak^{a, *}, S. L. Shalimov^{b, **}, S. A. Ryabova^{a, b}, and V. A. Kharlamov^a

^a*Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: spivak@idg.chph.ras.ru*

***e-mail: pmsk7@mail.ru*

Based on the analysis of data from the Geophysical Observatory “Mikhnevo” and the Center for Geophysical Monitoring of Moscow of the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, the response of the atmospheric boundary layer to the strong earthquakes with magnitudes starting from 7 is considered. It is shown that the Tohoku earthquake (March 11, 2011, Japan) can be associated with the variations in atmospheric pressure with periods ranging from 8 to 11 h that emerged after this event, whereas a series of the strong earthquakes discussed in the work are accompanied by the variations in the atmospheric pressure with periods close to the singlets of the fundamental free oscillation of the Earth ${}_0S_2$. Another effect after the earthquakes is the presence of the acoustic-gravity waves in the atmosphere with a period close to the Brunt-Väisälä period at large distances from the epicenter.

Keywords: earthquake, atmosphere, atmospheric pressure, variations, acoustic oscillations